

УДК 694.143, 69.07

ТУРКОВСКИЙ С.Б., ПОГОРЕЛЬЦЕВ А.А., СТОЯНОВ В.О.

ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВНЫХ ДЕРЕВЯННЫХ БАЛОК С НАКЛОННО-ВКЛЕННЫМИ СВЯЗЯМИ СДВИГА ИЗ СТЕКЛОПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРЫ

В области проектирования деревянных конструкций частой является задача расчета и конструирования составных элементов. Данная потребность возникает как при реконструкции существующих зданий и сооружений, так и при проектировании новых. Часто применение традиционных стальных арматурных стержней в качестве связей сдвига является недопустимым, либо нежелательным из-за риска коррозии. В статье приводятся результаты численных и экспериментальных исследований составных балок с наклонно-вклеенными связями сдвига из стеклопластиковой арматуры. В ходе исследований проводился сравнительный анализ работы цельного и составного элементов, определялась эффективность работы полимерной композитной арматуры, ее влияние на жесткость конструкции.

Ключевые слова: древесина, трещина, связи сдвига, стеклопластиковая арматура, составная балка

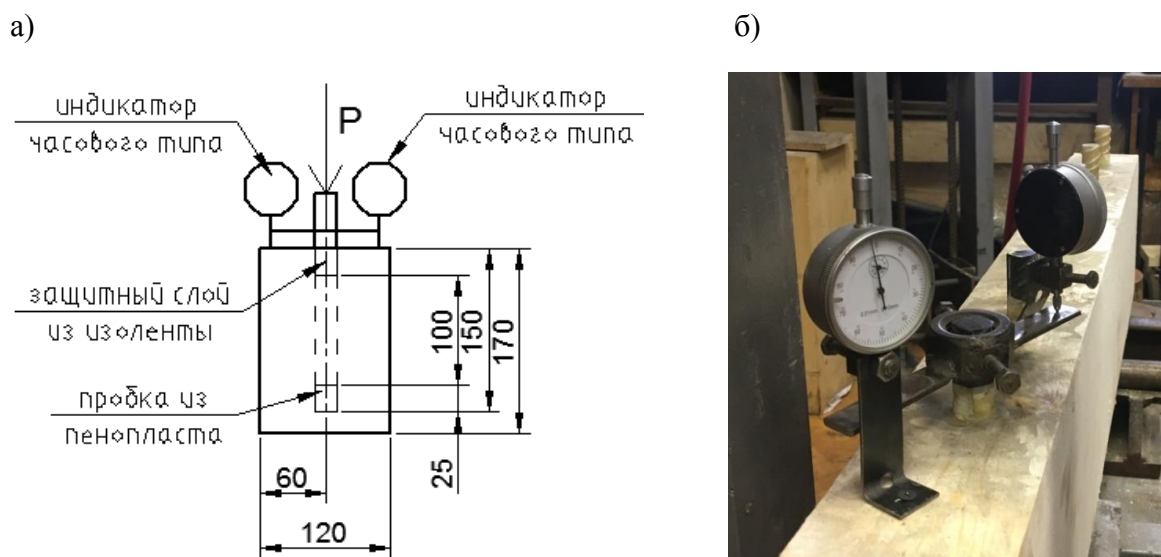
Актуальной задачей в области проектирования деревянных конструкций является расчет и конструирование балок составного сечения. При разработке проектов реконструкции здания такая задача возникает в случае необходимости устранения продольных трещин либо развития поперечного сечения имеющейся балки для существенного повышения ее прочности и снижения деформативности. В проектировании новых сооружений потребность в балках составного сечения может возникнуть при необходимости изготовления конструкций с сложным поперечным сечением, например, двутавровых балок, а также из-за особенностей технологического процесса завода-изготовителя деревянных конструкций, т.к. многие предприятия имеют ограничения по высоте сечения производимой балки (бруса).

Применение наклонно вклеенной металлической арматуры периодического профиля в качестве связей сдвига, разработанное в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, стало традиционным и зарекомендовало себя, как надежный способ сплавивания, который способен придавать составной балке прочность и деформативность, равноценную цельной конструкции таких же размеров [1,2]. В последнее время аналогичные варианты усиления применяются и за рубежом [12]. Однако у стальной арматуры есть ряд недостатков, главным из которых является коррозия в химически агрессивной среде, что накладывает ограничения в некоторых областях применения деревянных конструкций. Как известно, древесина является достаточно устойчивым материалом к воздействию химически агрессивных сред, что обуславливает ее применение в сооружениях для хранения минеральных удобрений, солей, различных руд. Наличие агрессивной среды и повышенной влажности делает приоритетным использование древесины в аквапарках, бассейнах, сооружениях на морском побережье. Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что при нарушении клеевого шва в зоне контакта составных элементов, вклеенный металлический стержень будет подвергнут воздействию агрессивной внешней среды. В условиях эксплуатации деревянных конструкций, такой дефект может вызвать коррозию металла и как следствие, разрушение связи сдвига.

Для обеспечения коррозионной стойкости связей сдвига в условиях агрессивных сред целесообразным является применение арматуры периодического профиля из полимерных композитов. Наиболее экономичным вариантом для использования является стеклопластиковая арматура (АСК), выполненная по ГОСТ 31938-2012 [3], которая по пределу прочности не уступает стальной арматуре.

Равнопрочность клеевого шва в случае замены стальной арматуры на АСК проверялась серией испытаний на продавливание вклеенных стержней в соответствии с требованиями ГОСТ Р 56710-2015 [4]. В три деревянных образца размерами 120×170×1000 мм было

вклеено по шесть стержней диаметром 20мм, три из которых – стальные, а три стеклопластиковые. Согласно пункту 8.34 СП 64.13330.2017 стержни, вклеенные под углом 20° и более к волокнам древесины, рассматриваются как вклеенные под углом, расчетное сопротивление древесины R^A выдергиванию или продавливанию для данных стержней остается постоянным вне зависимости от угла вклеивания [6]. Поэтому стержни были вклеены только поперек волокон в отверстия глубиной 150мм и диаметром 24мм. Моделирование работы стержня в массиве конструкции достигалось путем установки на дно стержня пробки из пенопласта высотой 25мм, а верхняя часть исключалась из работы путем устройства на стержне изолирующей прокладки. Это позволило обеспечить расчетную длину вклеивания 100мм или $5d$, при которых распределение касательных напряжений в клеевом шве по длине стержня близко к равномерному. На выпусках стержня было установлено по два индикатора часового типа ИЧ-10 (рисунок 1) [5].



а – схема испытания; б – общий вид испытания
Рисунок 1 – Испытание вклеенных стержней на продавливание

Нагрузка на стержни прикладывалась ступенями по 3кН до разрушения, которое во всех случаях происходило по границе клей-древесина из-за среза и скалывания древесины поперек волокон. Средняя нагрузка, при которой разрушались образцы со стальной арматурой составила ~62 кН, а со стеклопластиковой ~80 кН. Проведенные испытания свидетельствуют о том, что прочностные и деформационные свойства арматурных стержней из стеклопластика не уступают показателям стальной арматуры и их допускается использовать в качестве наклонно вклеенных связей при ремонте и усилении деревянных балок [5].

С целью проверки работы АСК в качестве связей сдвига в составных деревянных балках в Лаборатории деревянных конструкций ЦНИИСК им. В.А.Кучеренко было проведено испытание такой конструкции.

В качестве опытного образца была выбрана балка из клееной древесины размерами 100×350×3500мм. Нагрузка прикладывалась в виде двух сосредоточенных в третях пролета сил. В ходе эксперимента индикаторами часового типа ИЧ-50 и ИЧ-10 измерялись прогибы балки в середине пролета и деформации сдвига в шве сплачивания на торцах конструкции соответственно, относительные деформации древесины измерялись при помощи тензометрических датчиков, наклеенных в середине пролета конструкции. Схема испытания и общий вид установки приведены на рисунке 2 и 3 соответственно.

Испытания проводились в соответствии с методикой испытания деревянных конструкций [7,8]. Для того чтобы наиболее точно оценить эффективность работы наклонно вклеенных стержней из стеклопластика в качестве связей сдвига балка испытывалась в три этапа.

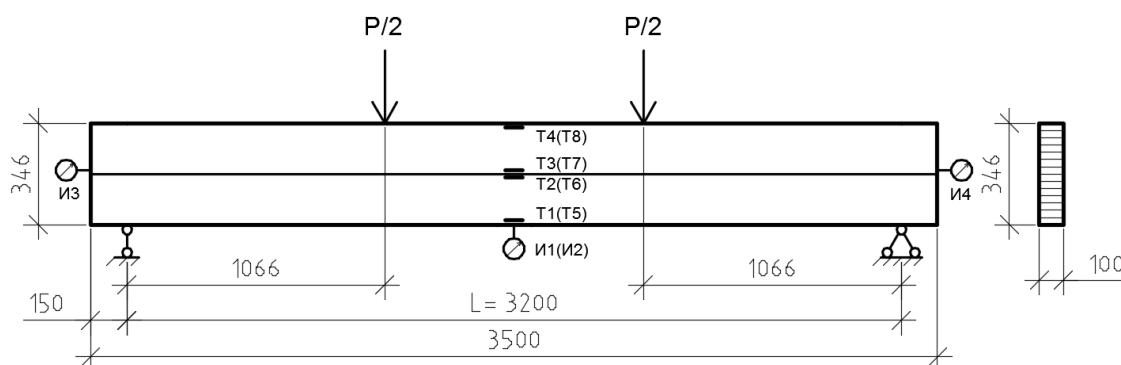


Рисунок 2 – Общая схема проведения испытаний



Рисунок 3 – Общий вид испытательной установки

Первый этап заключался в оценке деформативности цельной балки в пределах упругой работы и образец до разрушения не доводился. Конструкция нагружалась до нагрузки 40кН ступенями по 5кН, что составляло 0,1 от расчетной нагрузки (50,0 кН), на каждой ступени загрузки снимались показания приборов.

По завершению первого этапа опытная балка была распилена вдоль по всей длине на два равных элемента, таким образом, моделировалась сквозная продольная трещина в конструкции, размеры элементов составили 100×173×3500 мм. Задачей второго этапа испытаний ставилось исследование напряженно-деформированного состояния (НДС) составной балки без связей. На каждый из элементов в зоне контакта была уложена полиэтиленовая пленка, а зона контакта была обработана антифрикционной смазкой, что позволило минимизировать влияние сил трения на работу конструкции.

При отсутствии связей в составной конструкции, каждая ее составляющая работает, как отдельный элемент, что приводит к снижению прочности конструкции. В данной схеме испытания, из-за продольного разреза в середине сечения конструкции, расчетная прочность балки снижалась в два раза, а жесткость в 4 раза. Максимальная нагрузка, прикладываемая на балку, в ходе второго этапа составила 20кН, ступень нагружения – 2кН. Во время испытания отмечены значительные сдвиговые деформации на торце конструкции, порядка 3,5мм (рисунок 4).

После второго этапа эксперимента в балку были установлены наклонно клеенные связи сдвига. Деревянные элементы были стянуты струбцинами, для предотвращения смещения элементов друг относительно друга, и при помощи кондуктора под углом 45° в них были просверлены отверстия Ø25мм, после чего клеены стеклопластиковые стержни периодического профиля Ø20мм. Определение схемы расстановки и количества стержней, так же, как и работы по клеиванию производились согласно разработанной методике в соответствии с требованиями обновленного СП 64.13330.2017 «СНиП II-25-80 Деревянные конструкции» [4,6]. Несущая способность одного стержня определялась по формуле 1. Схема расстановки стержней в конструкции приведена на рисунке 5 и соответствует рекомендациям [9].



Рисунок 4 – Сдвиговые деформации на торце конструкции

$$T = R^A \pi d_1 l_p k_d k_c k_\sigma m_{дл} \prod m_i \cos \alpha \quad (1)$$

где R^A – нормативное сопротивление древесины выдергиванию либо продавливанию стержня, МПа;

d_1 – диаметр отверстия, м;

l_p – расчетная длина стержня в элементе, м;

k_d – коэффициент зависимости расчетного сопротивления от диаметра;

k_c – коэффициент неравномерности распределения напряжений сдвига;

k_σ – коэффициент зависящий от знака нормальных напряжений в зоне установки стержня;

$m_{дл}$ – коэффициент длительной прочности;

$\prod m_i$ – произведение коэффициентов условий работы;

α – угол наклона стержня.

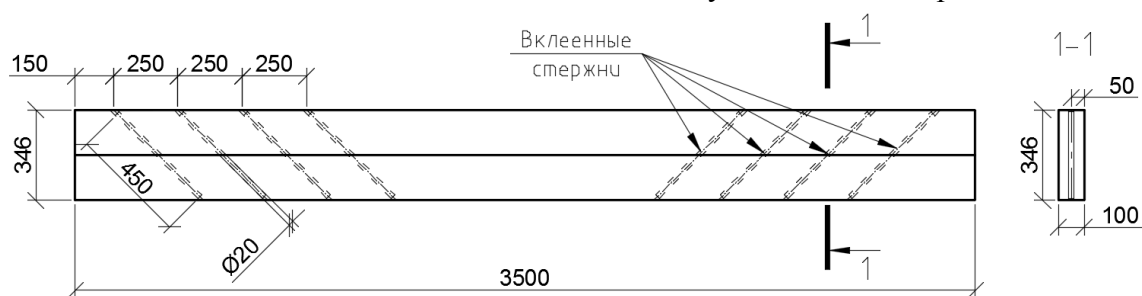


Рисунок 5 – Схема расположения вклеенных стержней в конструкции

На третьем этапе балка нагружалась ступенями по 10кН с целью доведения образца до разрушения. Расчетная нагрузка составляла 46,3 кН, разрушение балки наступило при нагрузке 101 кН в результате разрыва растянутых волокон древесины нижнего элемента, после чего последовало разрушение верхнего (рисунок 6). Клеевое соединение стержня с древесиной осталось без повреждений (рисунок 7).



Рисунок 6 – Разрушение образца из-за разрыва волокон древесины



Рисунок 7 – Клеевое соединение стержня и древесины после испытаний

По результатам испытаний построены графики зависимости прогибов от нагрузки на разных этапах эксперимента (рисунок 8). В составной балке без связей прогибы выше чем в цельной в 3,5 раза при одинаковых нагрузках. После установки связей прогибы в составной на 22% превышают прогибы в цельной, при теоретическом превышении 18 %. Сдвиговые деформации на торцах конструкции уменьшились более чем в 20 раз, график приведен на рисунке 9.

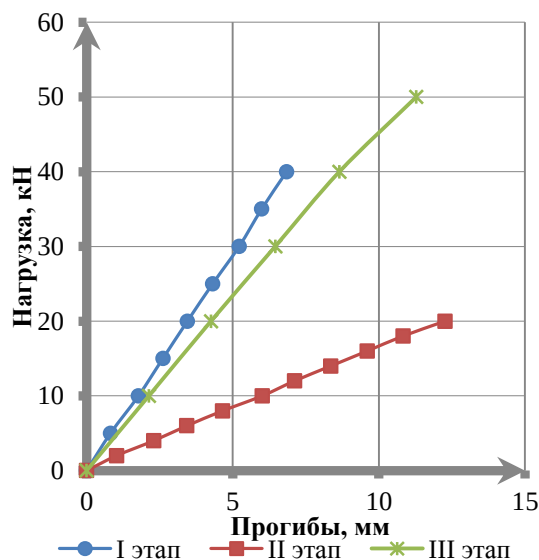


Рисунок 8 – Зависимость прогибов балки от прикладываемой нагрузки

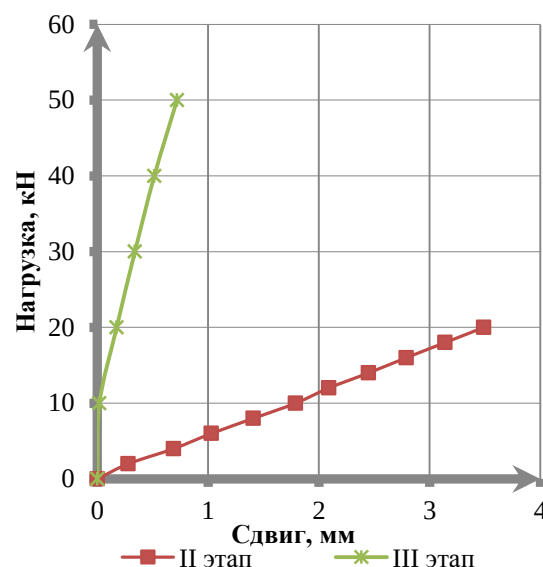


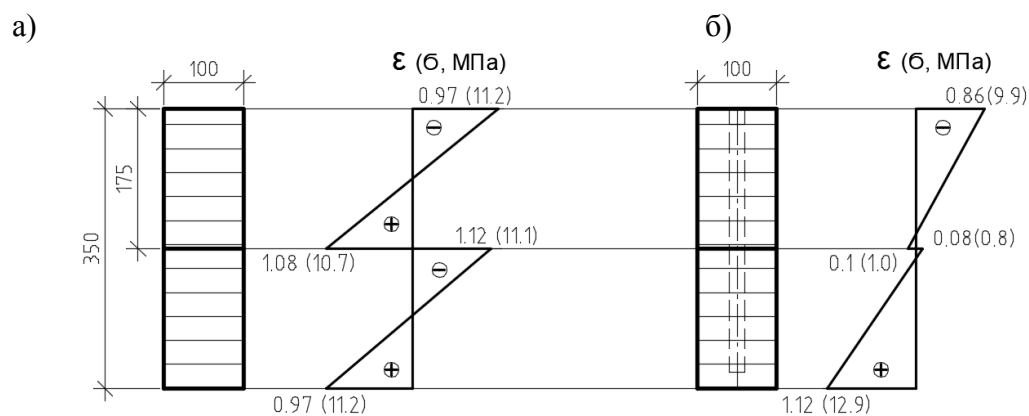
Рисунок 9 – Зависимость сдвиговых деформаций на торцах балки от прикладываемой нагрузки

По завершению основных этапов испытаний из опытной балки были выбраны стандартные образцы для определения модулей упругости древесины ламелей при изгибе согласно ГОСТ 16483.9-73 [10]. В ходе испытаний установлено, что модули упругости двух крайних ламелей в растянутой и сжатой зонах балки соответствуют показателям древесины I сорта ($E = 11,5$ ГПа), средние слои II-III сорта ($E = 9,9$ ГПа).

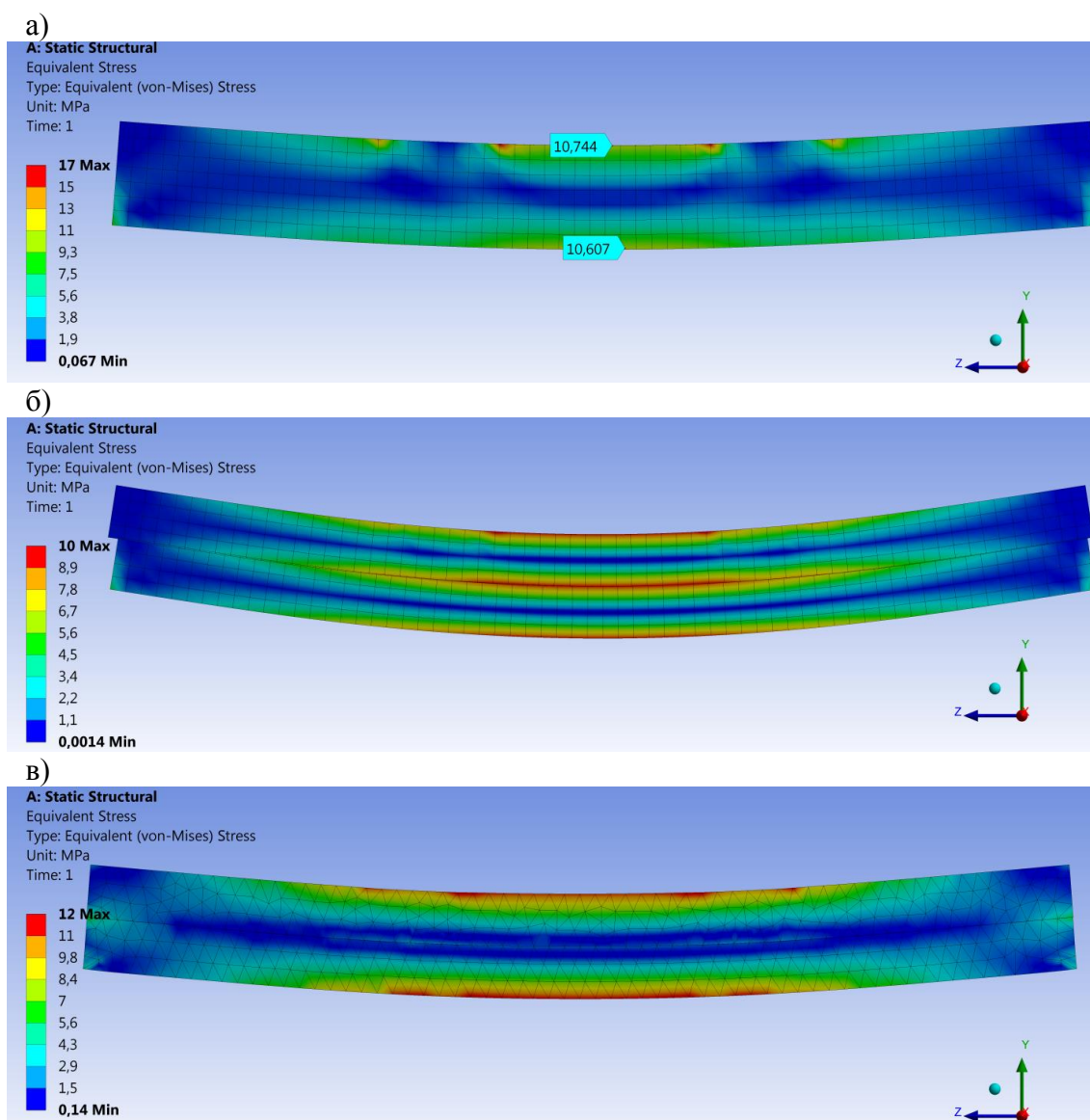
После обработки данных тензометрии были построены эпюры относительных деформаций и нормальных напряжений в зоне чистого изгиба балки без связей сдвига при нагрузке 20 кН (рисунок 10а) и со связями сдвига при нагрузке 40 кН (рисунок 10б). Как видно на рисунке 10б, в зоне нейтральной линии, нормальные напряжения приближены к нулевым значениям, что свидетельствует о работе конструкции, как цельного элемента.

Вместе с экспериментальными исследованиями составных деревянных элементов были также проведены и численные исследования конструкции в программном комплексе «Ansys». Геометрические размеры конструкции, схема нагружения и этапы численных исследований повторяют принятые при экспериментальных исследованиях. аналогичны экспериментальным. По результатам расчета получены изополя эквивалентных нормальных напряжений в конструкции для каждого из трех этапов исследования [11]. Эквивалентные нормальные напряжения позволяют определить местоположение нейтральной линии в конструкции. Как видно на рисунке 11б, в составной балке без связей элементы работают, как две отдельные балки, нейтральная линия проходит в середине каждого из элементов. После установки стержней из стеклопластика (рисунок 11в) балка начинает работать как цельная (рисунок 11а) – нейтральная линия смещается в середину сечения.

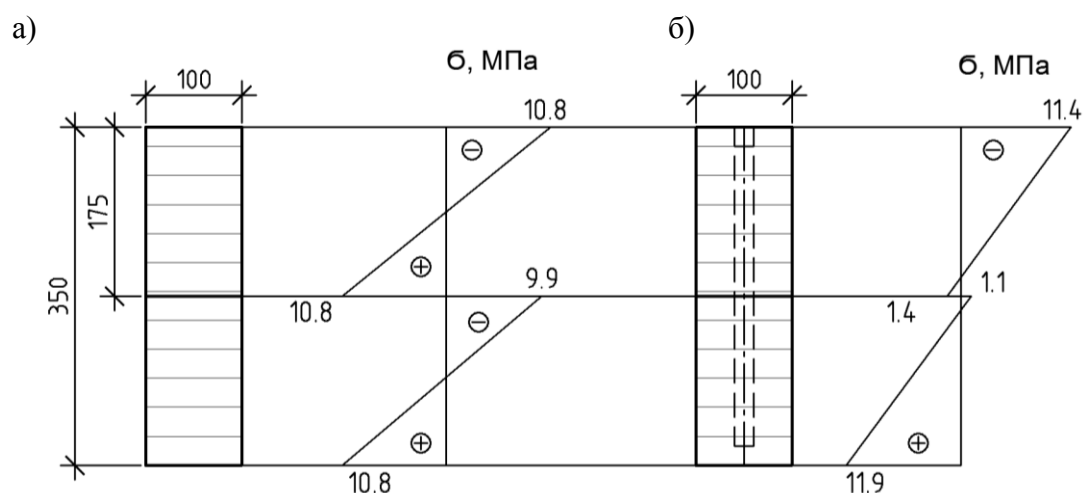
По результатам обработки данных расчета были также построены эпюры нормальных напряжений в зоне чистого изгиба для составной балки без связей при нагрузке 20 кН (рисунок 12а) и балки со связями при нагрузке 40 кН (рисунок 12б).



а – в элементе без связей (нагрузка 20 кН); б – в элементе со связями (нагрузка 40 кН)
Рисунок 10 – Эпюры относительных деформаций и нормальных напряжений в образце по результатам эксперимента



а – I этап, нагрузка 40 кН; б – II этап, нагрузка 20 кН; в – III этап, нагрузка 40 кН
Рисунок 11 – Изополя эквивалентных напряжений в балке по результатам численных исследований на различных этапах эксперимента



а – в элементе без связей (нагрузка 20 кН); б – в элементе со связями (нагрузка 40 кН)
Рисунок 12 – Эпюры нормальных напряжений в образце по результатам расчета

В дальнейших исследованиях составных балок на наклонных связях из полимерной арматуры одним из приоритетных направлений является определение коэффициента $k_{ж}$ при расчётах по второй группе предельных состояний, для корректного определения прогибов.

Анализируя полученные результаты исследований, можно сделать ряд выводов:

а) наклонно вклеенные стержни из стеклопластика эффективно включаются в работу в составных деревянных элементах;

б) деформативность составной балки со связями снижается более чем в 3 раза, по сравнению с балкой без связей и незначительно превышает деформативность цельной балки;

в) податливость наклонно вклеенных связей сдвига в составных элементах при расчете конструкции по второй группе предельных состояний необходимо учитывать коэффициентом $k_{ж}$.

Наклонно вклеенные стержни допускается применять для поперечного армирования приопорных зон балок в качестве аварийных связей. В случае возникновения продольных торцевых трещин, а так же трещин в зоне максимальных касательных напряжений, стеклопластиковые стержни будут эффективно включаться в работу, воспринимая сдвигающие усилия, тем самым сохраняя несущую способность либо предотвращая хрупкое разрушение конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Громацкий В.А., Зотова И.М., Турковский С.Б. Составные клееные деревянные элементы с наклонно вклеенными металлическими связями. «Экспресс-информация. Строительство и архитектура». - М.:ВНИИС, 1983. Сер. 11, вып.10.
2. Погорельцев А.А. Конструкции составного сечения и их изготовление //Совершенствование технологии изготовления деревянных конструкций. Сборник научных трудов / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. - М., 1991.
3. ГОСТ 31938-2012 Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия
4. ГОСТ Р 56710-2015 Соединения на вклеенных стержнях для деревянных конструкций. Технические условия, Москва, 2016. –6с.
5. Погорельцев А.А. Усиление деревянных балок с трещинами наклонным армированием стеклопластиковой арматурой / А.А. Погорельцев, В.О. Стоянов // Строительная механика и расчет сооружений, 2018. №1(276). С. 60-65.
6. СП 64.13330.2017 «СНИП II-25-80 Деревянные конструкции», Москва, 2017. – 97с.
7. Рекомендации по испытанию деревянных конструкций, ЦНИИСК, Москва Стройиздат, 1976
8. Рекомендации по испытанию соединений деревянных конструкций, ЦНИИСК, Москва Стройиздат, 1981

9. Погорельцев А.А. Практический метод усиления клеёных деревянных балок с трещинами наклонным армированием // Сборник научных трудов/Одесская государственная академия строительства и архитектуры. Современные строительные конструкции из металла и древесины, ч. 1. -2007. – С. 170 – 172.
10. ГОСТ 16483.9-73 Древесина. Методы определения модуля упругости при статическом изгибе.
11. Огородникова О.М. Конструкционный анализ в среде Ansys, учебное пособие//ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет - УПИ», Екатеринбург 2004
12. Shopski M. Glued-in steel rods subjected to combined axial and lateral loading/ Annual of the University of the architecture, civil engineering and geodesy Sofia, Volume 50, Issue 1, 2017

Турковский Станислав Борисович

Центральный научно-исследовательский институт им. В.А. Кучеренко, г. Москва
Доктор технических наук, заведующий сектором Лаборатории деревянных конструкций
Адрес: 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., д.6, корпус 1
Тел.: 8 (499) 174-77-45
E-mail: tsniiskldk@yandex.ru

Погорельцев Александр Алексеевич

Центральный научно-исследовательский институт им. В.А. Кучеренко, г. Москва
Кандидат технических наук, руководитель Лаборатории деревянных конструкций
Адрес: 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., д.6, корпус 1
Тел.: 8 (499) 174-77-45
E-mail: pogara@yandex.ru

Стоянов Владимир Олегович

Центральный научно-исследовательский институт им. В.А. Кучеренко, г. Москва
Магистр, аспирант Лаборатории деревянных конструкций
Адрес: 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., д.6, корпус 1
Тел.: 8 (968) 943-23-53
E-mail: vovik1992@gmail.com

TURKOVSKY S.B., POGORELTSEV A.A., STOYANOV V.O.

**STUDY OF COMPOSITE WOODEN BEAMS WITH TILT-INCLUDED
RELATIONSHIP BONDS FROM FIBERGLASS FITTINGS**

In designing of wooden structures, the problem of calculating and constructing composite elements is frequent. This need arises both in the reconstruction of existing buildings and structures, and in the design of new ones. However, often the use of traditional steel rods as shear bonds is unacceptable or undesirable due to the risk of corrosion. The article presents the results of numerical and experimental studies of a composite beam with glued-in shear links of fiberglass reinforcement. In the course of the research, a comparative analysis of the operation of the integral element and the composite one is carried out, the efficiency of the polymer composite reinforcement and its effect on the rigidity of the structure is determined.

Key words: timber, crack, shear bonds, GRP, composite beam

REFERENCES

1. Gromatskiy V.A., Zotova I.M., Turkovskiy S.B. Sostavnyye kleyenyie derevyannyye elementy s naklonno vkleyennymi metallicheskimi svyazyami. «Ekspress-informatsiya. Stroitel'stvo i arkhitektura». - M.:VNIIS, 1983. Ser. 11, vyp.10.
2. Pogorel'tsev A.A. Konstruktsii sostavnogo secheniya i ikh izgotovleniye //Sovershenstvovaniye tekhnologii izgotovleniya derevyannykh konstruktsiy. Sbornik nauchnykh trudov / TSNIISK im. V.A. Kucherenko. - M., 1991.
3. GOST 31938-2012 Armatura kompozitnaya polimernaya dlya armirovaniya betonnykh konstruktsiy. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya
4. GOST R 56710-2015 Soyedineniya na vkleyennykh sterzhnyakh dlya derevyannykh konstruktsiy. Tekhnicheskiye usloviya, Moskva, 2016. –6s.

5. Pogorel'tsev A.A. Usileniye derevyannykh balok s treshchinami naklonnym armirovaniyem stekloplastiko-voy armaturoy / A.A. Pogorel'tsev, V.O. Stoyanov // Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy, 2018. №1(276). S. 60-65.
6. SP 64.13330.2017 «SNIP II-25-80 Derevyannyye konstruktсии», Moskva, 2017. – 97s.
7. Rekomendatsii po ispytaniyu derevyannykh konstruktсий, TSNIISK, Moskva Stroyizdat, 1976
8. Rekomendatsii po ispytaniyu soyedineniy derevyannykh konstruktсий, TSNIISK, Moskva Stroyizdat, 1981
9. Pogorel'tsev A.A. Prakticheskiy metod usileniya kleyonykh derevyannykh balok s treshchinami naklonnym armirovaniyem // Sbornik nauchnykh trudov/Odesskaya gosudarstvennaya akademiya stroitel'stva i arkhitektury. Sovremennyye stroitel'nyye konstruktсии iz metalla i drevesiny, ch. 1. -2007. – S. 170 – 172.
10. GOST 16483.9-73 Drevesina. Metody opredeleniya modulya uprugosti pri staticheskom izgibe.
11. Ogorodnikova O.M. Konstruktsionnyy analiz v srede Ansys, uchebnoye posobiye//GOU VPO «Ural'skiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet - UPI», Yekaterinburg 2004
12. Shopski M. Glued-in steel rods subjected to combined axial and lateral loading/ Anual of the University of the architecture, civil engineering and geodesy Sofia, Volume 50, Issue 1, 2017

Turkovskii S.B.

JSC «Research center «Construction» (TSNIISK named after V.A. Kucherenko), Moscow, Russia
Doctor of technical Sciences, chief manager of the Sector in the Laboratory of wooden structures
Address: 109428, Moscow, 2nd Institutskaya str. 6, b.1
Tel.: 8 (499) 174-77-45
E-mail: tsniiskldk@yandex.ru

Pogoreltsev A.A.

JSC «Research center «Construction» (TSNIISK named after V.A. Kucherenko), Moscow, Russia
Candidate of technical Sciences, chief manager of the Laboratory of wooden structures
Address: 109428, Moscow, 2nd Institutskaya str. 6, b.1
Tel.: 8 (499) 174-77-45
E-mail: pogara@yandex.ru

Stoianov V.O.

JSC «Research center «Construction» (TSNIISK named after V.A. Kucherenko), Moscow, Russia
Master, postgraduate student in the Laboratory of wooden structures
Address: 109428, Moscow, 2nd Institutskaya str. 6, b.1
Tel.: 8 (968) 943-23-53
E-mail: vovik1992@gmail.com